第40卷 第8期
2023年8月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

天山南坡山前荒漠草地植物群落分布对环境因子的响应
——以拜城县为例

鲁元波[1,2,3]， 严 成[1,3]， 宋春武[1,3,4]， 李雅娟[5]， 来赖雲[5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
4. 中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站，新疆 石河子 832000；
5. 新疆拜城润华煤业有限公司，新疆 拜城 842300）

摘 要：为探明天山南坡拜城县山前荒漠草地植物群落分布对地形与土壤因子的响应，本研究选取了拜城山前荒漠草地典型区域进行调查，采用优势度法和典范对应分析（Canonical correspondence analysis，CCA）法，研究山地荒漠草地植物群落分布与地形和土壤因子之间的关系。结果表明：(1) 不同调查样点灌木层和草本层物种多样性存在差异，东坡调查样点Shannon-Wiener指数、Pielou指数和Simpson指数均表现为灌木大于草本，西坡和北坡调查样点Shannon-Wiener指数、Pielou指数和Simpson指数均表现为草本大于灌木；(2) 典范对应分析法分析结果表明，地形因子对植物群落的影响大小顺序为：坡向（SA）>坡度（SG）>坡位（SP），土壤因子对植物群落的影响大小为：30~100 cm土层土壤水分（SMC-2）>土壤总孔隙度（STP）>0~30 cm土层土壤水分（SMC-1）。地形和土壤因子对不同植物群落的形成具有一定的筛选作用，30~100 cm土层土壤水分和坡向是影响天山南坡拜城县山前荒漠草地植物群落分布的关键因子。

关键词：地形因子；土壤因子；天山南坡；寒旱地区；CCA分析

植物群落多样性是物种丰富度、均匀度、优势度和变化程度的综合反映[1]，是研究植物群落结构、稳定性和功能复杂性的基础，也是生物多样性保护的重要依据[2]。荒漠草地作为陆地生态系统中重要组成部分[3]，在环境保护中具有重要作用，它的变化会对我国西北干旱区荒漠生态系统产生深远的影响[4-5]。山地植物群落物种多样性小尺度上受地形因子(坡向、坡度、坡位)的影响较大[6-7]，地形因子中坡向和坡位通过改变太阳辐射、降雨等从而影响植物群落多样性[8-11]，坡度影响土壤养分、土壤水分等从而影响植物群落多样性[12-13]。同样，土壤作为植物生存的重要环境条件之一，直接影响植物对水分和养分的吸收，进而对植物群落结构和功能产生重要的影响[14]。在干旱区，土壤水分是影响植物生长的主要限制因子[15]，而土壤容重和总孔隙度不仅会影响植物根系的生长进而影响植物群落特征，同时还会影响土壤水分和土壤养分等因素从而影响植物群落特征[16-17]。因此，探究天山南坡寒旱地区地形和土壤因子对植物群落物种多样性的影响，对研究我国西北干旱地区受损生态系统的重建和生物多样性保护具有重要意义。

天山南坡寒旱地区多处于南坡低山及中山带，草地类型属于山地荒漠草地，由超旱生灌木、小灌木、半灌木和小半灌木组成，它们占据广大的山前洪积扇、石质河床以及山前丘陵区[18]。该区域降水少，植被稀疏，土质低劣，矿业开发破坏后极难恢复。目前，研究者对天山南坡的研究主要集中在矿区地质[19-20]、矿区勘探[21]、植被调查[22-24]、植被

收稿日期：2023-02-06； **修订日期：**2023-03-24
基金项目："拜城润华煤矿无(低)灌溉植被生态修复关键技术研发集成与试验示范"项目
作者简介：鲁元波(1996-)，男，硕士研究生，主要从事生态恢复研究. E-mail: 1652587990@qq.com
通讯作者：严成. E-mail: yancheng@ms.xjb.ac.cn

恢复[25-26]等领域，而关于地形与土壤因子和自然植物群落多样性之间的关系研究较少。因此，本研究采用优势度法和典范对应分析(Canonical correspondence analysis，CCA)方法，定量分析了天山南坡寒旱地区的植物群落多样性现状与地形及土壤因子的关联性，进而为该区域内受损生态系统的植被恢复及生物多样性保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆阿克苏地区拜城县北部前山带(42°5′33″~42°5′36″N，81°55′43″~81°55′55″E；图1)，平均海拔约2200 m，属温带大陆性干旱气候。年均气温7.6 ℃，极端最高气温38.3 ℃，极端最低气温−28.0 ℃，无霜期133~163 d，年均日照日数为2789.7 h。年均降水量约170.0 mm，且降水分布不均，主要集中在6—8月，占全年降水量的60%~70%[27-28]。土壤类型主要为山地栗钙土和山地棕钙土[22]。山前低位阶地植被分布以吐鲁番锦鸡儿(*Caragana turfanensis*)为灌木层建群种，伴生植物有芨芨草(*Achnatherum splendens*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)等；草本层主要以冷蒿(*Artemisia frigida*)、羊茅(*Festuca ovina*)为建群种，伴生有委陵菜(*Potentilla chinensis*)、沙葱(*Allium mongolicum*)等[29]。

1.2 试验设计

2022年7月为植物群落多样性最丰富时段，在研究区选择一处典型代表性山体作为调查样地。为去除海拔对研究区植被多样性的影响，样地选取在近2200 m海拔处一个有4个坡向的典型山包进行。通过样方法对样地植被进行调查，选择山体东、西、南、北4个坡向，在每个坡向上、中、下3个坡位分别布设5 m×15 m的调查样方(表1)，测定样方内灌木植物的种类、数量、株高和冠幅；在每个大样方内沿W型布设1 m×1 m草本样方，每个大样方中布设5个草本样方，共布设60个草本样方，草本样方记录草本物种的种类、株高、盖度及数量。对4个坡向中部0~100 cm深度土壤进行分层取样，每10 cm取一次样，共取40个土样测定不同坡向0~100 cm土壤水分。此外，对12个调查样点表层土壤0~30 cm土层进行取样，同样每10 cm取一次样，共取36个土样，分别测定0~30 cm土层土壤水分、土壤容重及土壤总孔隙度。

1.3 数据分析

1.3.1 *群落分类与排序* 采用优势度法对群落进行分类，即根据物种的重要值确定优势种，再根据优势种是否相同进行分类，根据《中国植被》群丛命名原则进行命名[30]；其次，使用Canoco 4.5软件对环境与植物群落进行典范对应分析确定与植物群落相关性最显著的环境因子。在CCA排序图中，各个环境因子的线条的长度表示这个环境因子与植物群落关系的大小，两条线条之间的夹角表示这两环境因子之间相关性的大小。通过SPSS 26.0软件进行方差分析和Pearson相关分析，Origin 2021绘图软件

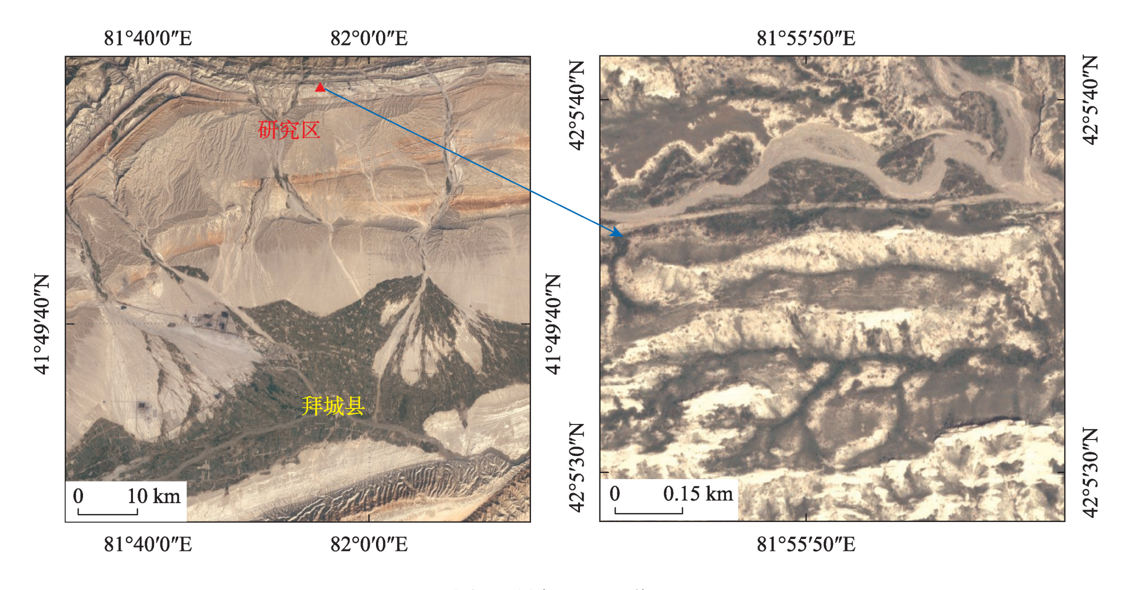


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

表1 试验样地地形和土壤因子基本特征

Tab. 1 Topographic and soil factor basic characteristics of the test plots

样地编号	海拔/m	坡位	坡向/(°)	坡度/(°)	0~30 cm土壤容重/(g·cm^{-3})
E1	2211.22	上坡位	21	18	1.61±0.12
E2	2203.76	中坡位	20	15	1.54±0.19
E3	2194.25	下坡位	30	14	1.34±0.29
W1	2222.96	上坡位	230	25	1.09±0.06
W2	2212.93	中坡位	240	25	1.17±0.23
W3	2199.41	下坡位	290	22	1.13±0.01
S1	2207.32	上坡位	340	30	1.56±0.27
S2	2199.78	中坡位	328	25	1.12±0.04
S3	2197.12	下坡位	292	24	1.39±0.13
N1	2209.86	上坡位	18	26	1.31±0.11
N2	2198.22	中坡位	2	22	1.27±0.02
N3	2183.45	下坡位	4	22	1.20±0.20

注:土壤容重数据为平均值±标准误。

进行绘图。

1.3.2 重要值 采用重要值反映物种在群落中的优势程度。重要值计算公式[31]如下:

$$灌木层重要值=(相对密度+相对高度+相对频度+相对优势度)/4 \quad (1)$$

$$草本层重要值=(相对高度+相对频度+相对盖度)/3 \quad (2)$$

1.3.3 物种多样性 植物群落组成调查包括群落盖度、植物种类、物种数量与高度[32];植物群落特征指标采用物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数和重要值作为植物分析指标[33-34]。

(1) 丰富度指数(S): 样方中物种数目。

(2) Simpson指数:

$$D=1-\sum(N_i/N)^2 \quad (3)$$

(3) Shannon-Wiener指数:

$$H=-\sum P_i \ln P_i \quad (4)$$

(4) Pielou均匀度指数:

$$E=H/\ln S \quad (5)$$

式中:N_i为种i的个体数;N为群落中全部物种的个体数;P_i代表种i的个体在全部个体中的比例;S为物种数目。

1.3.4 土壤因子测定 用铝盒迅速刮取土样,装入土盒中,及时带回实验室进行称重,采用烘干法测定土壤水分[35]。土壤容重和总孔隙度采用环刀浸泡法测定[36]。

2 结果与分析

2.1 不同地形条件下群落物种组成及类型划分

根据调查数据分析(表2),在不同坡向的调查样点中共有植物17种,其中灌木植物8种,草本植物9种,分属于11科14属。灌木植物以豆科、藜科和柽柳科植物最多,均为2种,共占物种总数的35.29%;草本植物以菊科植物最多,共3种,占物种总数的17.64%;禾本科、百合科和蔷薇科植物次之,均为2种,共占总物种的35.29%;此外,其他科属植物较少。

重要值是衡量物种在群落中的地位和作用的综合性数量指标[37]。灌木层中,吐鲁番锦鸡儿、浩罕彩花(*Acantholimon kokandense*)、琵琶柴(*Reaumuria soongonica*)和驼绒藜在各调查样带中均有分布,其中吐鲁番锦鸡儿重要值在东坡、西坡和南坡最大,为灌木层建群种,浩罕彩花、琵琶柴和驼绒藜重要值次之,为主要优势种;浩罕彩花在北坡重要值最大,为建群种,吐鲁番锦鸡儿为主要优势种;盐爪爪(*Kalidium foliatum*)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)仅分布于南坡中坡位样带中,且重要值较小,为群落中的偶见种。草本层中,冷蒿(*Artemisia frigida*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、沙葱和羊茅在各调查样点中均有分布,且在不同调查样点间各植物种的群落地位不同;除芨芨草在其所分布样带中

重要值较大外,其他植物种重要值均较小,为群落中的偶见种。

根据《新疆植物志》及样地群落中物种重要值的大小可将植物群落划分为5种群落类型(表3),其中群落Ⅱ的物种丰富度最大,主要优势种为吐鲁番锦鸡儿和芨芨草;群落Ⅳ的物种丰富度最小,主要优势种为琵琶柴和冷蒿;群落Ⅰ、群落Ⅲ和群落Ⅴ的物种丰富度居中,主要要优势种为吐鲁番锦鸡儿、浩罕彩花和羊茅。

2.2　不同地形条件下物种多样性特征

物种丰富度能客观反映生境中物种数目的多少[38]。由图2a可知,所调查样地中灌木层物种丰富度和草本层物种丰富度最大值均为8种,除E1、S1和S2调查样点外,其余调查样点草本层物种丰富度均大于灌木层。多样性指数是衡量一个生态系统功能和结构稳定性的重要指标[39]。E1、E2和E3调查样点Shannon-Wiener指数(图2b)、Pielou指数(图2c)和Simpson指数(图2d)均表现为:灌木层大于草本层,W1、W2、W3、N1、N2、和N3调查样点Shannon-Wiener指数、Pielou指数和Simpson指数均表现为:草本层大于灌木层。在南坡3个调查样点中,S3调查样点Shannon-Wiener指数和Simpson指数表现为:草本层大于灌木层,S1和S2调查样点表现为:草本层小于灌木层;Pielou指数在S3调查样点表现为:灌木层大于草本层,S1和S2调查样点表现为:草本层大于灌木层。

2.3　不同地形条件下土壤环境因子特征

根据各坡向和坡位0~30 cm土层土壤因子的调查(表4)表明,土壤水分、土壤容重和总孔隙度在不同样点间均具有显著($P<0.05$)差异,W3样点土壤水

表2　不同地形条件下植物的重要值

Tab. 2　Important values of plants under different topographic conditions

植物名称	东坡			西坡			南坡			北坡		
	E1	E2	E3	W1	W2	W3	S1	S2	S3	N1	N2	N3
浩罕彩花 *Acantholimon kokandense*	0.10	0.23	0.23	0.22	0.16	0.49	0.18	0.18	0.15	0.50	0.48	0.40
吐鲁番锦鸡儿 *Caragana turfanensis*	0.40	0.41	0.33	0.50	0.51	0.18	0.51	0.43	0.26	0.12	0.17	0.22
刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides*	0.12	0.06	0.00	0.07	0.03	0.00	0.19	0.04	0.04	0.07	0.00	0.00
驼绒藜 *Ceratoides latens*	0.14	0.09	0.17	0.12	0.19	0.12	0.08	0.13	0.23	0.13	0.13	0.13
琵琶柴 *Reaumuria soongonica*	0.09	0.11	0.17	0.05	0.05	0.14	0.04	0.10	0.28	0.10	0.07	0.14
木地肤 *Kochia prostrata*	0.15	0.11	0.10	0.04	0.05	0.08	0.00	0.04	0.01	0.08	0.15	0.10
盐爪爪 *Kalidium foliatum*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
骆驼刺 *Alhagi sparsifolia*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
芨芨草 *Achnatherum splendens*	0.00	0.51	0.41	0.00	0.00	0.46	0.00	0.46	0.00	0.00	0.43	0.60
冷蒿 *Artemisia frigida Willd*	0.24	0.11	0.22	0.14	0.14	0.18	0.20	0.20	0.33	0.19	0.15	0.08
羊茅 *Festuca ovina*	0.29	0.10	0.10	0.36	0.30	0.09	0.40	0.13	0.27	0.22	0.10	0.05
二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*	0.23	0.14	0.10	0.18	0.16	0.13	0.15	0.17	0.16	0.22	0.12	0.09
车前 *Plantago asiatica*	0.04	0.04	0.06	0.05	0.08	0.05	0.00	0.00	0.04	0.08	0.03	0.06
沙葱 *Allium mongolicum*	0.19	0.04	0.05	0.16	0.11	0.03	0.09	0.05	0.10	0.15	0.09	0.06
黄花瓦松 *Orostachys spinosus*	0.00	0.02	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
欧洲千里光 *Senecio vulgaris*	0.00	0.00	0.06	0.00	0.10	0.05	0.16	0.00	0.07	0.05	0.05	0.05
委陵菜 *Potentilla chinensis*	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.03	0.00

表3　不同样点植被群落类型

Tab. 3　Vegetation community types at different points

组	样点编号	群落类型	植物种类
Ⅰ	E1、W1、W2	吐鲁番锦鸡儿-羊茅群落(*Caragana turfanensis-Festuca ovina*)	15
Ⅱ	E2、E3、S2	吐鲁番锦鸡儿-芨芨草群落(*Caragana turfanensis-Achnatherum splendens*)	17
Ⅲ	W3、N2、N3	浩罕彩花-芨芨草群落(*Acantholimon kokandense-Achnatherum splendens*)	14
Ⅳ	S3	琵琶柴-冷蒿群落(*Reaumuria soongonica-Artemisia frigida*)	13
Ⅴ	S1、N1	浩罕彩花-羊茅+二裂委陵菜群落(*Acantholimon kokandense-Festuca ovina+ Potentilla bifurca*)	14

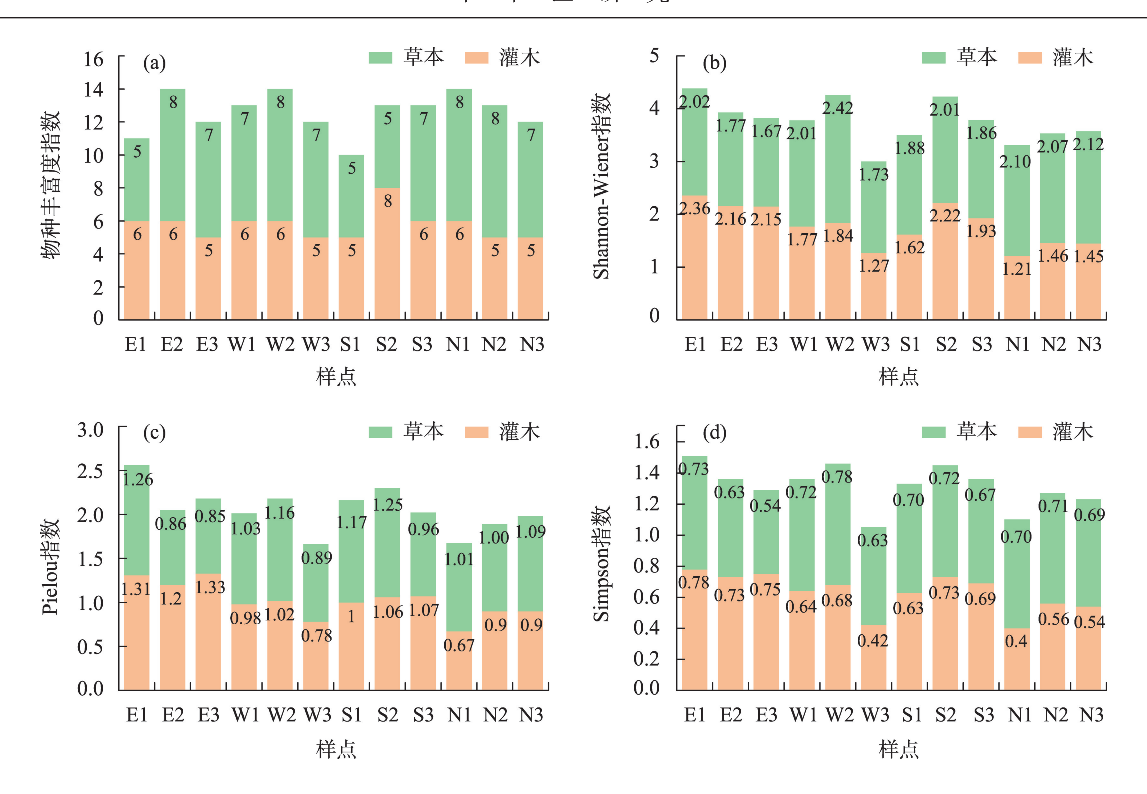


图2 不同地形条件下群落多样性特征

Fig. 2 Community diversity characteristics under different topographical conditions

表4 不同地形条件下土壤环境特征

Tab. 4 Soil environmental characteristics under different terrain conditions

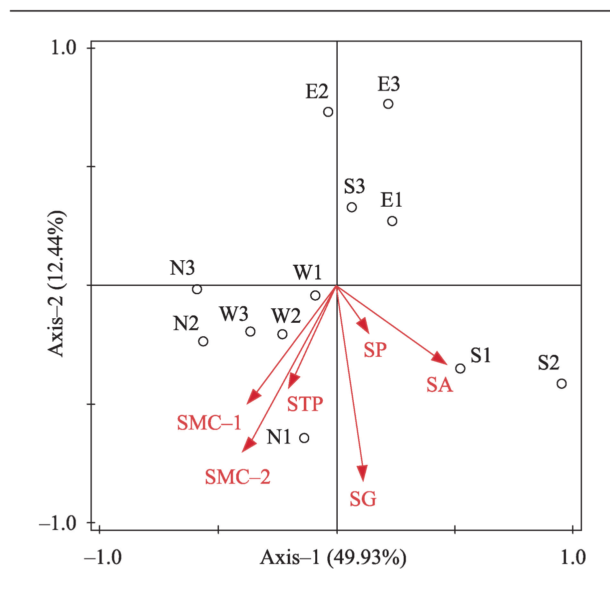
样点	0~30 cm土壤水分/%	0~30 cm土壤容重/(g·cm^{-3})	0~30 cm土壤总孔隙度/%
E1	0.85±0.14f	1.61±0.12a	39.35±4.67c
E2	1.45±0.31ef	1.54±0.19ab	41.79±7.32bc
E3	2.71±0.36ef	1.34±0.29ab	49.35±4.67bc
W1	3.86±0.19de	1.09±0.03c	58.87±1.00a
W2	6.13±1.12bc	1.17±0.23c	56.00±8.62a
W3	10.39±2.73a	1.13±0.01c	57.31±0.43a
S1	2.25±0.46ef	1.56±0.27ab	47.64±4.76bc
S2	6.31±1.41bc	1.12±0.04c	57.83±1.32a
S3	3.69±1.22de	1.39±0.13ab	41.15±10.02bc
N1	4.43±1.6de	1.31±0.03ab	50.57±1.13bc
N2	6.51±2.72bc	1.28±0.07bc	51.70±2.64ab
N3	6.77±0.83b	1.20±0.20c	54.83±7.63a

注:不同字母表示差异显著(P<0.05)。

分最大(10.39%),E1样点土壤水分最低(0.85%)。E1样点土壤容重最大(1.61 g·cm^{-3}),土壤总孔隙度最小(39.35%);W1样点土壤容重最小(1.09 g·cm^{-3}),土壤总孔隙度最大(58.87%)。表明在研究区不同样点间土壤环境特征具有空间异质性。

2.4 植物群落多样性指数与环境因子的典范对应分析

为了解影响调查区域内灌丛群落分布的主导因素,将8个物种多样性指数与7种环境因子进行CCA分析(图3)。物种多样性指数包括灌木物种丰富度、草本物种丰富度、灌木层Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Simpson指数和草本层Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Simpson指数;环境因子包括坡向(SA)、坡位(SP)、坡度(SG)、0~30 cm土层土壤容重(SC)、0~30 cm土层土壤总孔隙度(STP)、0~30 cm土层土壤水分(SMC-1)和30~100 cm土层土壤水分



注:SA为坡向;SP为坡位;SG为坡度;SMC-1为0~30 cm土壤水分;SMC-2为30~100 cm土壤水分;SC为土壤容重;STP为土壤总孔隙度。

图3 环境因子对植物群落特征影响的CCA排序图

Fig. 3 CCA ranking of the effects of environmental factors on plant community characteristics

(SMC-2)。7个地形和土壤因子对植物群落变异的总解释量为62.37%,其中第Ⅰ排序轴能够解释49.93%的植物群落变异,第Ⅱ排序轴能够解释12.44%的植物群落变异。SA、SP和SG与第Ⅰ轴表现为正相关,与第Ⅱ轴表现为负相关;SMC-1、SMC-2和STP与第Ⅰ轴和第Ⅱ轴均表现为负相关。E1、E2、E3等调查样点在排序轴的上方,主要分布于阳坡和土壤环境较恶劣区域;W1、W2、W3等调查样点分布于排序轴的左下方,主要分布于阴坡和土壤环境较好区域。随着各环境因子的减小,琵琶柴群落和浩罕彩花群落逐渐向吐鲁番锦鸡儿群落转变。

由表5可知,影响调查区域内植物群落分布的地形和土壤因子重要性排序依次为:SA>SMC-2>STP>SG >SP>SMC-1,其中SA和SMC-2是影响植物群落多样性的主要因子。

3 讨论

植物群落的科、属、种结构能够有效反映植物群落特征的变化情况,在不同地形条件下,植物群落结构存在差异,这是形成生态位互补的重要条件,有利于植物的正向演替[40]。研究发现,在研究区域内共调查到11科14属17种植物,其中菊科、豆科、藜科、禾本科为主要植物类群,表明该4大科类植物具有较强的生态适应性,能够适应贫瘠土壤和干旱的生态环境,这与杨晓玫等[41]的研究结果一致。重要值是以综合数值反映植物种在群落中地位和作用的重要指标[42]。本研究中,通过优势度法将调查区域内植被划分为5种主要群落类型,群落Ⅰ和群落Ⅱ为吐鲁番锦鸡儿群落,主要分布在各坡向的上坡位和中坡位,群落Ⅲ、群落Ⅳ和群落Ⅴ为浩罕彩花群落和琵琶柴群落,主要分布在各坡向的下坡位。研究表明,土壤容重过大,土壤总孔隙度减小,使得植物根系可活动空间减小,导致可被植物吸收的土壤水分减少;土壤容重过小,土壤总孔隙度增大,会导致整个土壤层不稳定,不利于土壤储存水分[43-44]。群落Ⅰ和群落Ⅱ所分布的E1、E2和E3调查样点土壤质地为砂砾岩, W1和W2调查样点土壤容重低,孔隙度大,透水性强,不利于储水,植物生长土壤环境恶劣;S1和S2调查样点坡度较大,坡度越大水分流失越多,土壤受侵蚀的可能性越大,使土壤变得浅薄而贫瘠[45]。吐鲁番锦鸡儿具有耐旱性强、耐瘠薄、生长季耐低温生长特性、根系发达等特点[46-47],因此,能够在该恶劣的土壤环境条件下成为优势种。随着坡位的下降,吐鲁番锦鸡儿群落向浩罕彩花群落和琵琶柴群落转变,这是因为

表5 植物群落CCA排序结果

Tab. 5 CCA ranking results of plant communities

环境因子	解释变量/%	贡献率/%	*F*值	*P*值	重要性排序
SA	26.5	40.6	4.1	0.03*	1
SP	3.3	5	0.5	0.68	5
SG	8.9	13.6	1.4	0.246	4
SMC-1	1.1	1.7	0.2	0.922	6
SMC-2	14.9	22.8	1.7	0.192	2
STP	10.6	16.3	1.9	0.166	3
SC	–	–	–	–	–

注:*表示在0.05水平(双侧)显著相关。

下坡位砾石含量下降,细粒径土壤增多,土壤环境得到改善,适生植物增多,群落生物多样性增加,导致群落类型发生变化[48]。草本层中羊茅、冷蒿、和芨芨草等均具有耐旱、耐瘠薄、根系发达、生长季耐低温等特点[49-51]。羊茅根系能够分泌大量黏胶物质将周围细小的砂土颗粒粘接起来,在边坡表面可形成根-土复合体保护层结构[52],因此能够在各坡向上部生长成为优势种。冷蒿能成为S3调查样点草本层优势种是因为南坡土壤为沙质土壤,随着坡位的下降,土壤砾石含量下降,土壤类型由砂砾岩向沙质土壤转变,而冷蒿非常适应沙质土壤[53],因此成为草本层优势种。相较而言,芨芨草耐旱性稍差,适合生长在土层深厚区域[54],各坡向下部位土层较厚,因此芨芨草只生长在各坡向的下部位。在未来生态修复过程中,应贯彻灌草结合模式,根据具体生态修复区域的土壤和地形条件,选择不同植物种进行搭配修复。

物种多样性是植物群落生态系统功能复杂性的重要度量[55]。研究发现,S2调查样点灌木丰富度大于其他调查样点,这可能是因为南坡为阳坡,热量环境较好,此外,其土壤容重处于植物正常生长区间,土壤总孔隙度良好,有利于植物的生长;西坡和北坡草本丰富度大于东坡和南坡,这与王子婷等[56]在黄土丘陵区研究不同坡向草本群落分布特征的结果相一致。本研究中,东坡灌木层和草本层Shannon-Wiener指数自上而下逐渐降低,北坡灌木层和草本层Shannon-Wiener指数表现为自上而下逐渐升高;东坡和南坡灌木层Shannon-Wiener指数大于西坡和北坡;草本层Shannon-Wiener指数小于西坡和北坡。研究表明,灌木层Shannon-Wiener指数表现为:阴坡>阳坡,草本层Shannon-Wiener指数表现为:阳坡>阴坡[57],这与本研究结果恰恰相反,这主要是因为本研究中土壤水分为表层0~30 cm土壤水分,不是灌木植物的限制因子,相反阳坡热量充足,有利于灌木植物的生长;羊茅、冷蒿等植物均为耐阴草本植物,阴坡较为阴凉,土壤水分环境相对较好,更利于草本植物的普遍发育和生长。研究发现,东坡与南坡Pielou指数和Simpson指数均表现为:灌木层大于草本层,西坡与北坡Pielou指数和Simpson指数均表现为:草本层大于灌木层。王梅等[58]研究结果表明,阳坡多样性指数表现为:灌木层>草本层,阴坡多样性指数表现为:草本层>灌木层,这与本研究结果一致。这主要是因为吐鲁番锦鸡儿、琵琶柴等均为喜阳灌木植物,充足的热量有利于其生长,而更多的草本植物更适合生长在土壤水分较好的阴坡[59]。从坡位上来看,除北坡外,其他坡向灌木层与草本层Pielou指数和Simpson指数均表现为:上、中坡位大于下坡位,这与郝凌颖[60]对紫金山不同坡向林分结构的研究结果一致。综上所述,在该区域的生态修复过程中,阳坡因为热量条件较好,土壤水分条件较差,应充分考虑灌木植物作为生态恢复主要方向;阴坡因为热量条件较差,土壤水分条件较好,应多考虑耐阴草本植物作为恢复物种。

CCA排序能够很好地解释植物群落与环境因子之间的内在联系,也能反映出不同物种的生态分化现象[61]。本研究CCA结果显示,坡向和30~100 cm土层土壤水分是影响植物群落分布的主要因子。有研究表明,坡向对植物群落特征及物种多样性具有明显影响[62],该结果与本研究结果一致。干旱区土壤水分是影响植物生长的主要限制因子[63-64],研究表明,20~60 cm深度土壤水分对灌木植物的生存和生长起关键作用[65],这与本研究结果相似。土壤水分的垂直分布影响植被对水分的利用,使得各物种形成不同的生态位适应性[66]。Young等[67]对多年生草本研究结果表明,植物根系分布随降雨量的变化而发生变化,在干旱时期(年降水量242 mm)根系分布规律与深根系多年生草本相似,植物的生长受浅深层土壤水分影响更大,结合本研究调查区域(年降雨量170.1 mm),这与本研究结果基本一致。本研究中,选取的7个环境因子对植物群落变异进行解释,总解释量为62.37%,解释较好,但除所选因子外,土壤化学性质和气候因子也会影响植物群落特征[68-69]。此外,还可能存在人为干扰、种间相互作用等因素,对此还有待进一步的研究。

4 结 论

本文基于植物调查、地形和土壤因子测定,对植物多样性指数进行了分析,对植物多样性指数与地形及土壤因子进行了典范对应分析,来探究天山南坡拜城县山前荒漠草地植物群落分布对环境因子的响应。主要结论如下:

(1) 植物多样性指数表明,除物种丰富度指数外,其他多样性指数在东坡和南坡主要表现为:灌

木层大于草本层,西坡和北坡主要表现为:草木层大于灌本层,天山南坡拜城县山前荒漠草地植物物种少且分布不均,少数物种占据较大优势。

(2)植物多样性与环境因子的分析表明,坡向(SA)和30~100 cm土层土壤水分(SMC-2)是影响天山南坡拜城县山前荒漠草地植物多样性的主要因子,坡度、坡位、土壤容重和土壤总孔隙度等环境因子也会对植物多样性产生影响。

参考文献(References):

[1] 王健铭, 钟悦鸣, 张天汉, 等. 中国黑戈壁地区植物物种丰富度格局的水热解释[J]. 植物科学学报, 2016, 34(4): 530-538. [Wang Jianming, Zhong Yueming, Zhang Tianhan, et al. Plant species richness patterns and water-energy dynamics in the Black Gobi Desert, China[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(4): 530-538.]

[2] 宋晶晶, 方建民, 苏守香, 等. 长江中下游滩地草本植物群落物种多样性研究[J]. 安徽林业科技, 2022, 48(5): 3-7, 20. [Song Jingjing, Fang Jianmin, Su Shouxiang, et al. Study on the species diversity of herbaceous communities in marshlands along the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2022, 48(5): 3-7, 20.]

[3] 袁小强, 王敏, 张鲜花, 等. 乌鲁木齐周边典型荒漠草地群落物种多样性及生物量关系研究[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1253-1262. [Yuan Xiaoqiang, Wang Min, Zhang Xianhua, et al. Study on the relationship between species diversity and biomass of typical desert grassland communities around Urumqi[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(5): 1253-1262.]

[4] 王公鑫, 井长青, 董萍, 等. 新疆荒漠草地生物量估算及影响因素研究[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1862-1872. [Wang Gongxin, Jing Changqing, Dong Ping, et al. Study on biomass estimation and influencing factors of desert grassland in Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7): 1862-1872.]

[5] 陈宸, 井长青, 邢文渊, 等. 近20年新疆荒漠草地动态变化及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 2021,30(3): 1-14. [Chen Chen, Jing Changqing, Xing Wenyuan, et al. Desert grassland dynamics in the last 20 years and its response to climate change in Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3): 1-14.]

[6] 王采娥. 三江源区山坡退化高寒草甸和灌丛植被、土壤养分空间格局及土壤侵蚀研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [Wang Cai'e. Spatial Pattern of Vegetation and Soil Nutrients and Soil Erosion of Degraded Alpine Meadows and Shrub of Hillside in the Headwaters Regions of Three-River on Tibetan Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.]

[7] 熊斌梅, 雷耘, 汪正祥, 等. 地形对七姊妹山自然保护区植物丰富度及分布格局的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(11): 2307-2313. [Xiong Binmei, Lei Yun, Wang Zhengxiang, et al. Effects of topography on plant species richness and distribution in Qizimei Mountains Nature Reserve[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(11): 2307-2313.]

[8] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156. [He Qihua, He Yonghua, Bao Weikai. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Mountain Research, 2003, 21(2): 149-156.]

[9] 陶娟平, 王宇坤, 刘峰贵, 等. 西藏一江两河地区耕地垦殖强度影响因子及其临界值确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 239-246. [Tao Juanping, Wang Yukun, Liu Fenggui, et al. Identification and determination of its critical values for influencing factors of cultivated land reclamation strength in region of Brahmaputra River and its two tributaries in Tibet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(15): 239-246.]

[10] 胡永春, 范新宇, 邵毅贞, 等. 地形和光照因子对白云山国家森林公园苔藓植物功能性状的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 89-96. [Hu Yongchun, Fan Xinyu, Shao Yizhen, et al. Effects of topographic and light factors on bryophytes functional traits in Baiyun Mountain National Forest Park[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 89-96.]

[11] Campbell F W, Kulikowski J J, Levinson, J. The effect of orientation on the visual resolution of gratings[J]. The Journal of Physiology, 1996, 187(2): 427-436.

[12] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(6): 582-590.

[13] Bardelli T, Gómez-Brandón M, Ascher-Jenull J, et al. Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1041-1055.

[14] Veresoglou S D, Mamolos A P, Thornton B, et al. Medium-term fertilization of grassland plant communities masks plant species-linked effects on soil microbial community structure[J]. Plant and soil, 2011, 344: 187-196.

[15] 李继文, 尹本丰, 索菲娅, 等. 荒漠结皮层藓类植物死亡对表层土壤水分蒸发和入渗的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6533-6541. [Li Jiwen, Yin Benfeng, Sophia, et al. Effects of moss mortality on soil water evaporation and infiltration of moss-dominated biological soil crusts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6533-6541.]

[16] 陈双双, 朱宁华, 周光益, 等. 不同等级石漠化环境下人工乔木林的植被与土壤物理特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 52-61. [Chen Shuangshuang, Zhu Ninghua, Zhou Guangyi, et al. Vegetation and soil physical characteristics of artificial arbor forests under different grades of rocky desertification[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(1): 52-61.]

[17] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 722-

732. [Sun Ningting, Wang Xiaoyan, Zhou Hao, et al. Effects of kind and incorporation depth of biochars on water movement and nitrogen and phosphorus loss in purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 722-732.]

[18] 张立运. 新疆拜城盆地天然草场的基本特点[J]. 中国草原, 1982(2): 9-13. [Zhang Liyun. Basic characteristics of natural grassland in Baicheng Basin, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Grassland, 1982(2): 9-13.]

[19] 罗金海, 车自成, 周宁超, 等. 南天山南缘下二叠统小提坎立克组英安岩的地球化学和同位素地质年代学特征[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 29-37. [Luo Jinhai, Che Zicheng, Zhou Ningchao, et al. Geochemistry and isotopic geochemistry of dacites from the lower permian Xiaotikanlike formation in the southern margin of South Tianshan Mountains, and its tectonic significances[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(1): 29-37.]

[20] 梁艳, 黄勇. 天山南坡山区公路崩塌灾害分布及危险性评价[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(10): 109-113. [Liang Yan, Huang Yong. Distribution and risk assessment of highway collapse disaster in the mountainous area of the southern slope of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Applied Technology Edition), 2014(10): 109-113.]

[21] 李本亮, 陈竹新, 雷永良, 等. 天山南缘与北缘前陆冲断带构造地质特征对比及油气勘探建议[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 395-403. [Li Benliang, Chen Zhuxin, Lei Yongliang, et al. Structural geology correlation of foreland thrust- folded belts between the southern and northern edges of the Tianshan Mountain and some suggestions for hydrocarbon exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 395-403.]

[22] 刘彬, 布买丽娅木·吐如汗, 艾比拜姆·克热木, 等. 新疆天山南坡中段种子植物区系垂直分布格局分析[J]. 植物科学学报, 2018, 36(2): 191-202. [Liu Bin, Bumaliyam Turuhan, Abibaimu Keremu, et al. Vertical distribution patterns of the seed plant flora in the middle section on the southern slopes of the Tianshan Mountains in Xinjiang (China)[J]. Plant Science Journal, 2018, 36(2): 191-202.]

[23] 胡玉昆, 李凯辉, 阿德力·麦地, 等. 天山南坡高寒草地海拔梯度上的植物多样性变化格局[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 182-186. [Hu Yukun, Li Kaihui, Adeli Maidi, et al. Plant species diversity of alpine grasslands on southern slope of Tianshan Mountain along altitude gradient[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 182-186.]

[24] 李凯辉, 胡玉昆, 阿德力·麦地, 等. 天山南坡高寒草地物种多样性及地上生物量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 155-159. [Li Kaihui, Hu Yukun, Adeli Maidi, et al. Species diversity and above- ground biomass of alpine grassland on the southern slope of Tianshan Mountain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(1): 155-159.]

[25] 刘德林. 矿区生态恢复治理方案研究[J]. 煤炭科技, 2022, 43(1): 13-16. [Liu Delin. Research on ecological restoration managements plan in mining area[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(1): 13-16.]

[26] 胡隽秋. 新疆煤炭开发与煤化工发展应充分考虑生态和水资源条件[J]. 中国煤炭, 2012, 38(10): 5-9, 33. [Hu Juanqiu. To develop coal and coal chemical industry in Xinjiang, Ecosystem and water resources conditions should be fully considered[J]. China Coal, 2012, 38(10): 5-9, 33.]

[27] 张晓, 刘娟, 刘亮. 新疆拜城盆地平原区地下水动态特征分析[J]. 新疆地质, 2017, 35(z1): 46-49. [Zhang Xiao, Liu Juan, Liu Liang. Dynamic characteristics of groundwater in the plain area of Baicheng Basin, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2017, 35(z1): 46-49.]

[28] 贺忠发, 曹月娥, 何浩天, 等. 2009—2020年拜城县土地利用与"三生空间"时空变化研究[J]. 江西农业学报, 2022, 34(1): 217-226. [He Zhongfa, Cao Yue'e, He Haotian, et al. Study on spatial and temporal changes of land use and productionliving-ecological space in Baicheng County from 2009 to 2020[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(1): 217-226.]

[29] 艾比拜姆·克热木. 新疆拜城盆地种子植物区系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2016. [Abibaimu Keremu. Analysis of the Floristic Characteristics of Seed Plants in Baicheng Basin, Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2016.]

[30] 王炜, 裴浩, 王鑫厅. 优势种植被分类系统的逻辑分析与示例方案化[J]. 生物多样性, 2016, 24(2): 136-147. [Wang Wei, Pei Hao, Wang Xinting. A logistic analysis on vegetation classification system based on dominant species with an illustrational scheme [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(2): 136-147.]

[31] 张世雄, 秦瑞敏, 杨晓艳, 等. 山西吕梁山草本群落物种多样性的海拔梯度格局及与环境因子的关系[J]. 广西植物, 2020, 40(12): 1860-1868. [Zhang Shixiong, Qin Ruimin, Yang Xiaoyan, et al. Patterns of species diversity in herbaceous communities at different altitude gradients and their relationships with environmental factors in Lüliang Mountains in Shanxi Province, China[J]. Guihaia, 2020, 40(12): 1860-1868.]

[32] 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 190-196. [Liu Ying, Xu Li, Feng Fei, et al. Species diversity and community stability at early stage of vegetation reconstruction in Gangue hill slope of Wuhai Mining area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 190-196.]

[33] 李群, 赵辉, 赵成章, 等. 洮河国家湿地公园主要植物群落多样性对土壤环境因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2674-2684. [Li Qun, Zhao Hui, Zhao Chengzhang, et al. Response of main plant community diversity to soil environmental factors in Taohe National Wetland Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2674-2684.]

[34] 张晓龙, 周继华, 蔡文涛, 等. 水分梯度下黑河流域荒漠植物群落多样性特征[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4627-4635. [Zhang

Xiaolong, Zhou Jihua, Cai Wentao, et al. Diversity characteristics of plant communities in the arid desert of the Heihe Basin under different moisture gradients[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (14): 4627-4635.]

[35] 杨明杰, 杨广, 何新林, 等. 干旱区梭梭茎干液流特性及对土壤水分的响应[J]. 人民长江, 2018, 49(6): 33-38. [Yang Mingjie, Yang Guang, He Xinlin, et al. Stem sap flowing characteristics of *Haloxylon ammodendron* and its response to soil moisture in arid area[J]. Yangtze River, 2018, 49(6): 33-38.]

[36] 杨志强, 王丽艳, 梁洪宇, 等. 短管赤眼蜂Argonaute蛋白基因家族鉴定及表达分析[J]. 植物保护, 2017, 43(6): 38-45. [Yang Zhiqiang, Wang Liyan, Liang Hongyu, et al. Identification and expression analysis of Argonaute protein gene family in Trichogramma pretiosum[J]. Plant Protection, 2017, 43(6): 38-45.]

[37] 庞久帅, 原阳晨, 周苗苗, 等. 槭叶铁线莲(*Clematis acerifolia* Maxim.)群落物种生态位研究[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3449-3457. [Pang Jiushuai, Yuan Yangchen, Zhou Miaomiao, et al. Species niche of *Clematis acerifolia* Maxim. community[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3449-3457.]

[38] 王思齐, 朱章明. 中国蔷薇属植物物种丰富度分布格局及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 209-219. [Wang Siqi, Zhu Zhangming. Relationships between species richness pattern of *Rosa* L. and environmental factors in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 209-219.]

[39] 冯凌, 喻理飞, 王阳, 等. 喀斯特地区植被不同恢复阶段功能冗余和功能多样性对群落稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 670-678. [Feng Ling, Yu Lifei, Wang Yang, et al. The effects of the functional redundancy and functional diversity on the community stability in different stages of the plant communities restoration in Karst vegetation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(4): 670-678.]

[40] 何芳兰, 刘世增, 李昌龙, 等. 甘肃河西戈壁植物群落组成特征及其多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 74-78. [He Fanglan, Liu Shizeng, Li Changlong, et al. Study on composition and diversity of phytocoenosium in Gobi region of Hexi, Gansu [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30 (4): 74-78.]

[41] 杨晓玫, 姚拓, 王理德, 等. 天祝不同退化程度草地植物群落结构与物种多样性研究[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1290-1297. [Yang Xiaomei, Yao Tuo, Wang Lide, et al. Community structure and plant diversity under different degrees of degraded grassland in Tianzhu, Gansu[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(6): 1290-1297.]

[42] 丁晖, 陈水飞, 徐辉, 等. 2013—2018年武夷山亚热带常绿阔叶林乔木层动态[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3458-3469. [Ding Hui, Chen Shuifei, Xu Hui, et al. Dynamics of arbor layer in the subtropical evergreen broad-leaved forest in the Wuyi Mountains, Fujian Province, southeastern China in 2013-2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3458-3469.]

[43] 宋丽, 杨秀云, 米美霞, 等. 太原市公园绿地土壤容重特征研究[J]. 山西农业科学, 2020, 48(5): 779-783. [Song Li, Yang Xiuyun, Mi Meixia, et al. Study on soil bulk density characteristics of park green space in Taiyuan City[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(5): 779-783.]

[44] 董起广, 何靖. 土壤容重变化对作物产量的影响[J]. 农家科技, 2018(11): 99-100. [Dong Qiguang, He Jing. Effects of soil bulk density change on crop yield[J]. Nongjia Keji, 2018(11): 99-100.]

[45] 邓美皎. 太白红杉不同时间尺度上径向生长的特征及其与环境的关系[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016. [Deng Meijiao. Characteristics of Radial Growth of *Larix chinensis* on Different Time Scales and Its Relationship with the Environment[D]. Xi' an: Shaanxi Normal University, 2016.]

[46] 贾盛杰, 贾月梅, 潘兰, 等. 新疆产4种锦鸡儿属植物总黄酮含量研究[J]. 新疆医科大学学报, 2016, 39(10): 1230-1231, 1235. [Jia Shengjie, Jia Yuemei, Pan Lan, et al. Determination of total flavonoids content of four genus *Caragana* Fabr in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2016, 39(10): 1230-1231, 1235.]

[47] 成雅京, 齐继. 几种沙生植物在北京植物园的引种种植[C]//北京园林学会, 北京市园林绿化局, 北京市公园管理中心. 2010北京园林绿化新起点. 北京: 中国林业出版社, 2010: 3. [Cheng Yajing, Qi Ji. Introduction and planting of several sandy plants in Beijing Botanical Garden[C]// Beijing Garden Association, Beijing Municipal Bureau of Landscape Architecture, Beijing Park Management Center. 2010 New Beginnings of Beijing Gardening. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010: 3.]

[48] 武吉华, 张绅, 江源, 等. 植物地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 284. [Wu Jihua, Zhang Shen, Jiang Yuan, et al. Plant Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 284.]

[49] 王超华. 丛生型克隆植物高羊茅的分蘖规律及生长型的可塑性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010. [Wang Chaohua. Researsh on Tillering Laws and the Plasticity of Growth Forms of Clonal Plant Tall Fescue Grass (*Festuca arundinacea*)[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.]

[50] 侯牡丹, 王明玖, 李志强, 等. 放牧强度对短花针茅草原3种主要植物营养繁殖性能的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 71-75. [Hou Mudan, Wang Mingjiu, Li Zhiqiang, et al. Effects of grazing intensity on the characteristics of vegetative production of three plants in the *Stipa breviflora* steppe[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(1): 71-75.]

[51] 胡文革, 赵亚东, 闫平, 等. 盐碱地环境下芨芨草土壤微生物群落的初步分析[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 197-200. [Hu Wenge, Zhao Yadong, Yan Ping, et al. The preliminary analysis of soil microbial community of planting *Achnatherum splendens* (Trin) Nevski under saline and alkali land environment[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 197-200.]

[52] 宋享桦, 谭勇, 张生杰. 暴雨气候下砂土边坡植被护坡模型试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 123-133. [Song

Xianghua, Tan Yong, Zhang Shengjie. Investigation on effects of vegetations on stability of sandy slope by indoor rainfall model test [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 123–133.]

[53] 米佳, 刘花, 石晶, 等. 典型草原4种植物根际水分和土壤养分特征研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2022, 45(4): 1128–1137. [Mi Jia, Liu Hua, Shi Jing, et al. Characteristics of water and soil nutrients in rhizosphere of four plants in the typical steppe of northern China[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2022, 45(4): 1128–1137.]

[54] 李成凯. 青藏高原黄土区四种草本植物单根抗拉特性研究[J]. 中国水土保持, 2008(5): 33–35. [Li Chengkai. Study on single root tensile characteristics of four herbaceous plants in the loess area of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(5): 33–35.]

[55] 王兆东, 谢利娟, 龙丹丹, 等. 银湖山郊野公园典型植物群落物种多样性比较[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4): 16–24. [Wang Zhaodong, Xie Lijuan, Long Dandan, et al. Comparison on plant species diversity of typical plant communities in the Yinhushan Country Park[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(4): 16–24.]

[56] 王子婷, 杨磊, 李广, 等. 黄土丘陵区坡面柠条(*Caragana korshinskii*)林地草本植物分布特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 120–128. [Wang Ziting, Yang Lei, Li Guang, et al. Distribution and diversity of herbage under *Caragana korshinskii* plantation at hillslope scale in the semi-arid loess hilly region[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 120–128.]

[57] 宋玲玲, 田青, 李宗杰. 岷山摩天岭北坡东南部植物群落α多样性与地形特征的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(3): 67–74. [Song Lingling, Tian Qing, Li Zongjie. Relationship between α diversity of plant community and topographic features in the southeast of Motianling northern slope in Min Mountain[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(3): 67–74.]

[58] 王梅, 张文辉. 不同坡向人工油松林生长状况与林下物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2009, 29(8): 1678–1683. [Wang Mei, Zhang Wenhui. Growth and species diversity of *Pinus tabulaeformis* artificial forest on different slope aspects[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(8): 1678–1683.]

[59] 刘振学, 任广鑫, 康冰, 等. 辛家山不同坡向次生林群落物种多样性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 197–202. [Liu Zhenxue, Ren Guangxin, Kang Bing, et al. The species diversities under secondary forest communities on different slope aspects in Xinjiashan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(4): 197–202.]

[60] 郝凌颖. 紫金山不同坡位林分结构与生物多样性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012. [Hao Lingying. Research about Stand Structure and Species Diversity on Different Slopes of the Purple Mountain[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.]

[61] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 445–450. [Luan Qingshan, Sun Jun, Song Shuqun, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River Estuary, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 445–450.]

[62] 木拉提江·夏地买买提, 艾克拜尔·伊拉洪, 阿马努拉·依明尼亚孜. 坡向和海拔对乌孙山草地植物群落特征及物种多样性的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(11): 2724–2733. [Mulatijang Xiadimaimaiti, Aikebier Ilahun, Amanula Yimingniyazi. Effects of aspect and altitude on characteristics and diversity of grassland plant communities in Wusun Mountain[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(11): 2724–2733.]

[63] 巩炜. 荒漠–绿洲过渡带斑块状植被区土壤水分入渗特征及其影响因素[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021. [Gong Wei. Characteristics of Soil Water Infiltration and Its Influencing Factors in Patchy Vegetation Areas in the Desert-Oasis Transition Zone[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.]

[64] 李梅梅. 疏叶骆驼刺生物固氮空间变异及其控制因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. [Li Meimei. Spatial Variation of Biological Nitrogen Fixation in Sparse-Leaved *Alhagi sparsifolia* and Its Controlling Factors[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.]

[65] 王家强, 韩路, 柳维扬, 等. 塔里木河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间格局变化关系研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 1–10. [Wang Jiaqiang, Han Lu, Liu Weiyang, et al. Variable relationship of soil moisture and spatial pattern along desert oasis transition zone in the Tarim River middle reaches basin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 1–10.]

[66] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127–3136. [Zou Hui, Gao Guangyao, Fu Bojie. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semiarid areas: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3127–3136.]

[67] Young S L, Kyser G B, Barney J N, et al. Spatio-temporal relationship between water depletion and root distribution patterns of *Centaurea solstitialis* and two native perennials[J]. Restoration Ecology, 2010, 18: 323–333.

[68] 李亚萍, 蒋进, 宋春武, 等. 莫索湾地区典型沙丘土壤因子与短命植物物种多样性的关系[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 912–919. [Li Yaping, Jiang Jin, Song Chunwu, et al. Relationship between soil factors and ephemeral plant species diversity on typical sand dunes in the Mosuowan Region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 912–919.]

[69] 丛微, 于晶晶, 喻海茫, 等. 不同气候带森林土壤微生物多样性和群落构建特征[J]. 林业科学, 2022, 58(2): 70–79. [Cong Wei, Yu Jingjing, Yu Haimang, et al. Diversity and community assembly of forest soil microorganisms in different climatic zones[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(2): 70–79.]

Response of plant community distribution in the pre-montane desert grassland on the southern slope of Tianshan Mountain to environmental factors: A case study in Baicheng County

LU Yuanbo[1,2,3], YAN Cheng[1,3], SONG Chunwu[1,3,4], LI Yajuan[5], LAI Zhaoyun[5]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Engineering Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Mosuo Bay Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 5. Xinjiang Baicheng Runhua Coal Industry Co., Ltd., Baicheng 842300, Xinjiang, China)

Abstract: To investigate the response of plant community distribution to topography and soil factors in the pre-mountain desert grassland of Baicheng County on the southern piedmont of Tianshan Mountain, we selected a typical area for investigation. We used the dominance method and canonical correspondence analysis (CCA) to study the relationship between plant community distribution and topography and soil factors in the mountain desert grassland. We observed differences in the species diversity of shrub and herb layers between survey sample sites. Specifically, the Shannon-Wiener index, Pielou index, and Simpson index on the eastern slope showed more shrubs than herbs; while on the western and northern slopes, these indexes showed more herbs than shrubs. The results of CCA show that topographic factors influenced plant community diversity in the order of slope orientation > slope gradient > slope position; and soil factors influenced plant community diversity in the order of soil moisture in the 30−100 cm soil layer > total soil porosity (STP) > soil moisture in the 0−30 cm soil layer (SMC-1). Topography and soil factors had certain screening effects on the formation of plant communities. Soil moisture in the 30−100 cm soil layer and slope orientation were the key factors affecting the distribution of plant communities in the pre-mountain desert grassland of Baicheng County on the southern piedmont of Tianshan Mountain.

Keywords: terrain factors; soil factors; southern slopes of the Tianshan Mountains; cold and arid areas; canonical correspondence analysis